

淡路市北淡震災記念公園風力発電設備における倒壊事故について

1. 設備概要と事故概要

1-1 設備概要

- 所在地：兵庫県淡路市小倉
- 運転開始：平成14年4月

1-2 風力発電設備概要（単機）

- 型式：三菱重工業製 MWT-S600
- 出力：600kW
- 回転数：10-34rpm
- ロータ直径：45m（取付位置：地上37.0m）

1-3. 事故概要

- 推定時刻：平成30年8月23日 22:57
<周辺の事象、倒壊シーケンスより推定>
- 発見時刻：平成30年8月24日 6:15頃
付近を散歩している住民が発見。
- 倒壊状況：北北東（真北から約14度東寄り）に向けてタワー全体が倒伏、ローターヘッドが地面に激突。2枚のブレードは先端付近が折損し飛散、1枚のブレードはシェルが桁部分から分離し飛散。基礎は、ペデスタル部・フーチング部が分離し、主鉄筋が破断。

所在地

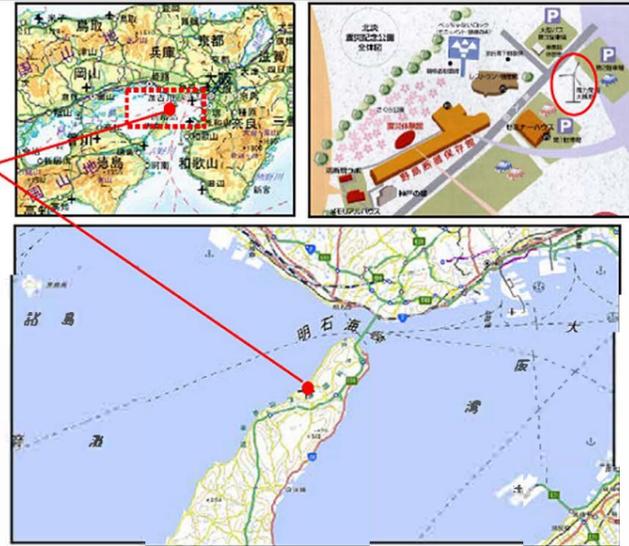


図1-1 サイト位置図



図1-9 構内柱①（折損）



図1-10 構内柱②（倒伏）

周辺の事象：8月23日 22:57～22:58に関西電力からの配電が停止。

2019年3月11日
淡路市・（株）ほくだん

- 周辺の被害：
施設の構内柱①が1本ブレードにより切断され、別の構内柱②が1本倒伏した。

2. 風車の運転状況と管理体制について

2-1 風車の廃止に至る状況について

平成29年5月21日に電力変換装置が故障。運転停止。
風車の運転を継続するための概算費用をケースに応じて試算<7～21百万円>
過去15年間の維持管理（保守点検含）費用・売電費用は、それぞれ55百万円・76百万円。
→風車の運転を継続するための費用および過去15年間の維持管理（保守点検含）費用・売電費用を考慮し、平成29年9月に風車を廃止する方向で淡路市は決定。
風車の撤去完了時期の目標設定を平成31年度末としていた。

2-2 風車の管理体制について

風車の管理体制については、図2-1・表2-1に示すとおり設置者<（株）ほくだん>を中心として、所有者<淡路市>や電気主任技術者等<（一財）関西電気保安協会・（株）きんでん・三菱重工業（株）>の管理範囲が多階層に及んでいた。

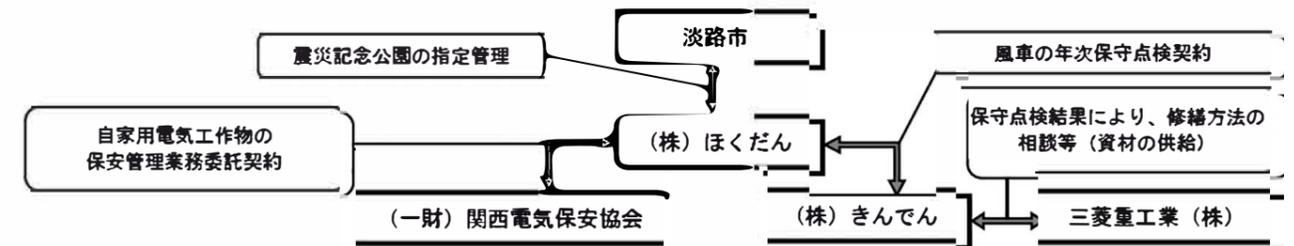


図2-1 管理体制図

表2-1 管理体制概要

淡路市	（株）ほくだん	（一財）関西電気保安協会	（株）きんでん	三菱重工業（株）
風車の設置・所有者 <以下「所有者」>	風車を含む公園の指定管理者 <以下「管理者」>	電気主任技術者（外部委託） <以下「保安管理業務外部受託者」>	風車の年次保守点検の受託者 <以下「保守点検者」>	風車の製造者 <以下「製造者」>
公園管理担当者（正副2名）がいたが、指定管理や施設を利用した観光施策の事務を行うだけで、風車に関する日常管理や運転に関する安全意識は薄かった。	震災記念公園全体の運営管理を行う中、職員の減少もあり、運転停止した風車に対する管理意識が薄れていた。保安規程における総括管理者は代表取締役が担い、連絡責任者・運転責任者は同一人物であり、責任感を持った担当者が事実上1名であった。	自家用電気工作物の保安管理業務委託契約に基づき電気保安業務担当者を定めて電気設備の月次点検、年次点検等を実施（風車については電気設備のみ対象）<平成25年11月の契約が現在も継続>	保守点検業務委託契約に基づき風力発電設備部分の年次点検を実施。（日常点検・遠隔監視は含まない。）<毎年度、保守点検に関する委託契約を締結。>	（株）きんでんから修繕方法の相談等。（資材の供給）



図1-2 倒壊状況



図1-4 基礎部（ペデスタル底面）



図1-5 鉄筋破断（フーチング上面）



図1-6 鉄筋破断面（ペデスタル底面）

- 鉄筋に腐食は確認されなかった。

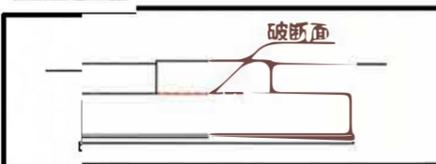


図1-7 基礎図（破断面）



図1-8 ローターヘッドが地面に激突

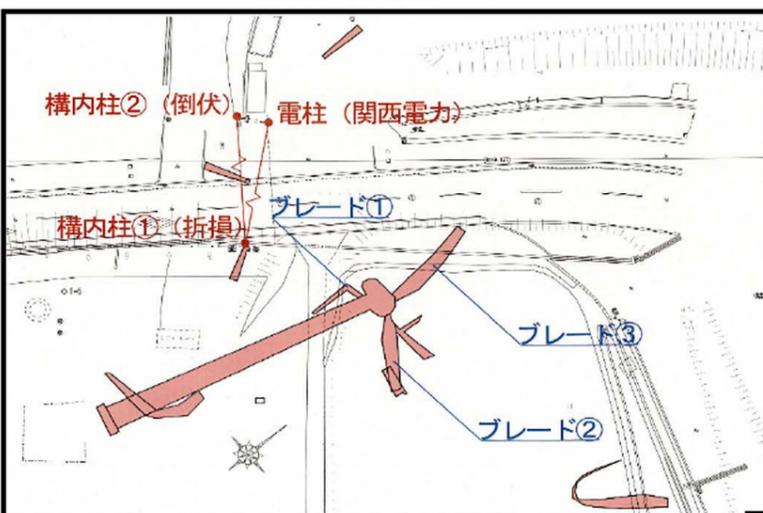
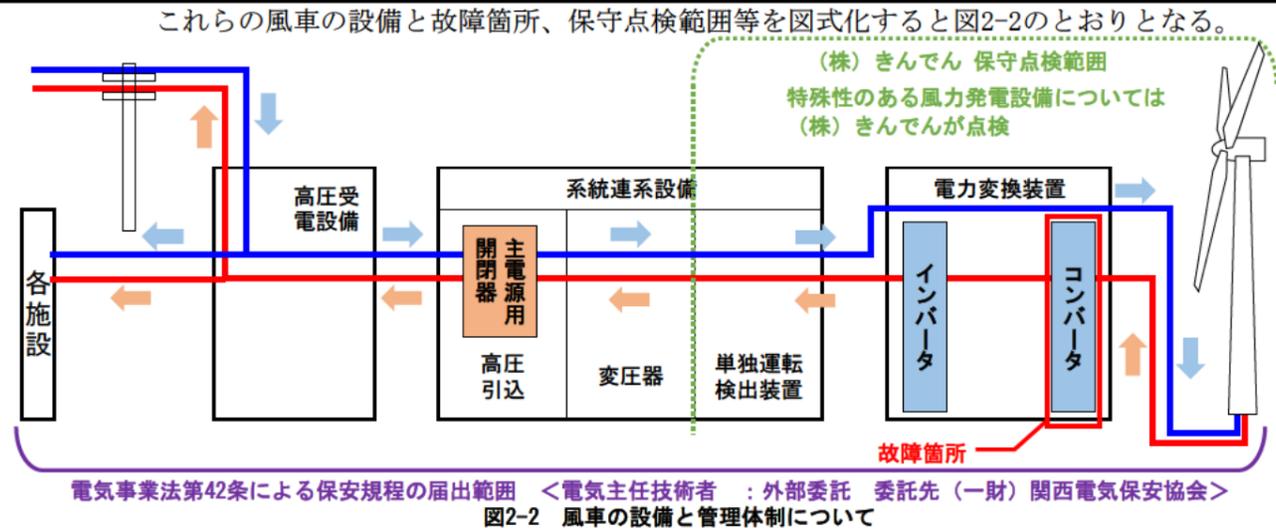


図1-3 ブレードの飛散と周囲の状況

淡路市北淡震災記念公園風力発電設備における倒壊事故について



3. 運転停止から事故発生時までの風車の状況について

3-1. 運転停止 (H29.5) 時の風車の制御について

- 主電源用開閉器は、運転停止当時は「入」の状態であった。
- 運転停止当時、制御指令は働いていた<ピッチ角はフェザーリング、強風時 (30m/s×2秒、10分平均風速25m/s) のみヨー追従>。

3-2. 主電源用開閉器について

- 停電 (瞬間停止を含む) の発生があれば、単独運転防止機能により「切」となる状態。

保安管理業務外部受託者の月次点検・年次点検結果

H29. 7. 21からH29. 12. 20の月次点検等では主電源用開閉器は「切」であった。
H30. 1. 15の月次点検では主電源用開閉器は「入」であった。
H30. 1. 22の構内の全停電以降の月次点検等では、主電源用開閉器は「切」であった。

- 管理者は、平成29年8・9・11月、平成30年1月に主電源用開閉器を「入」にした。

3-3. ピッチ制御について

- 当機は、油圧によるピッチ制御であり、一定期間は、アキュムレーターによる吐出圧でフェザー角を維持出来る状態であった (一定期間の電源停止には対応できるため、非常用電源はない)。

3-4. ヨー制御について

- 電源の供給がなく、事故発生時には制御されていなかった。

3-5. 遠隔監視装置 (サーバPC、制御状況の記録用) について

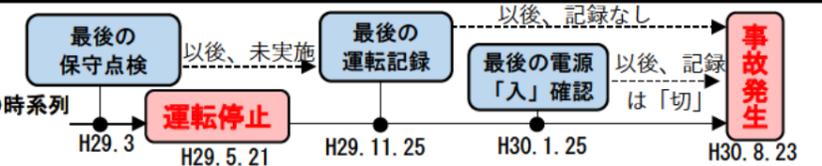
- 管理者は、所有者が風車を廃止する決定をしたことを受け、遠隔監視装置のモニター表示により発電していない状況を入館者らに見せることを避けるために装置の電源を切った。これにより、平成29年11月26日以降における運転状況、主電源用開閉器、警報履歴の記録はない。
- 事故発生後に遠隔監視装置のデータを分析した結果、平成29年11月24日～25日の時点で、制御油ポンプモータは停止している可能性があることが判明した。また、平成29年11月25日の記録によると、長期間の電源停止によりフェザー角を維持していなかった。

3-6. 保守点検契約について

- 所有者・管理者は、運転停止した風車には、保守点検の必要がないと考え、平成30年度の保守点検を契約しなかった。このことにより、平成29年3月の保守点検を最後に、風車の保守点検が実施されなかった。

- 運転記録等との時系列列は図3-1のとおり。

図3-1 運転記録等との時系列



3-7. 主電源用開閉器の放置について

- 管理者は、風車は故障しているため主電源用開閉器は「切」にしておくべきとの認識であった。
- 管理者は、強風により生じたブレードの回転を停止するため、年に数回の「入」操作を行ったが、その操作状況は所有者、保守点検者、保安管理業務外部受託者に情報共有がされていなかった。
- 保安管理業務外部受託者は、主電源用開閉器の「切」状態の良否について管理者に確認していたが、業務の報告書に記載がなかった。
- 所有者・管理者・保安管理業務外部受託者は、主電源用開閉器が「切」の場合のリスクを認識していなかった。
- 取扱説明書に電源供給がない場合のリスクが記載されていなかった。

3-8. 管理状況のまとめ

本風車の管理は、所有者・管理者・保安管理業務外部受託者等の多階層組織が内在することで、管理体制・責任所在が不明確であった。これにより、管理者からの連絡不足が生じ、加えて、風車の制御に対する誤認識が重なることで、長期間の電源停止と運転記録の欠測が生じた。

4. 倒壊に至る物理的要因の究明

4-1. 現地調査

- 10/29～10/30に事故風車のナセル・ブレードの現地調査を実施。



図4-1 破壊ブレードの復元 図4-2 ナセルとタワーの分離

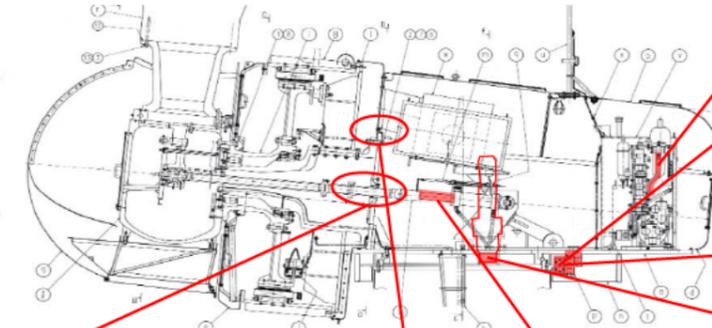


図4-3 ナセル断面図



ピッチ制御用油圧シリンダーの出代計測

油圧出代の計測により、調査時点では、ファインに近い角度であった。

(シリンダ出代 ファイン角:50mm、フェザー角:344mm)

地面との衝突により、油圧シリンダは座屈し、支持構造物は変形していた。計測された出代は地面との衝突で縮んでいるため、風車倒壊前の値については不明である。



油圧系統の状態



ヨーブレーキの状態

ヨーブレーキディスク、ブレーキパッドは正規の厚みと状態を保っていた。



ヨー駆動装置の状態

2台のヨーモータに内蔵されている機械ブレーキは各々ブレーキ拘束の状態が保たれており、モータブレーキは正常な状態であった。ヨーピニオンの歯欠けがあり、欠けた歯は相手側のギアに噛込んで回転していた。

淡路市北淡震災記念公園風力発電設備における倒壊事故について

調査結果は、以下のとおりである。

- ・ 風車の倒壊に伴い、ピッチ制御用油圧シリンダー及び2台のヨーモータが損傷したため、風車倒壊時点での風車のピッチとヨー角度は特定できなかった。
- ・ ピッチ制御に関しては、平成29年11月24日～25日の時点で制御油ポンプモータは停止している可能性があったことや平成29年に強風によりブレードの回転が発生したことからピッチ制御ができていなかったと推定した。
- ・ ヨー制御に関しては、2台のヨーモータに内蔵されている機械ブレーキは各々ブレーキ拘束の状態が保たれており、モータブレーキは正常な状態であったが、電源の供給がなく、事故発生時にヨー制御ができていなかったと推定した。

4-2. 解析・検証フロー

- ・ 当風車の倒壊シーケンスの推定にあたっては、以下のフロー図により、検証を行った。

4-3. 風向・風速の評価

4-5. 風荷重の評価

4-4. 耐力の評価

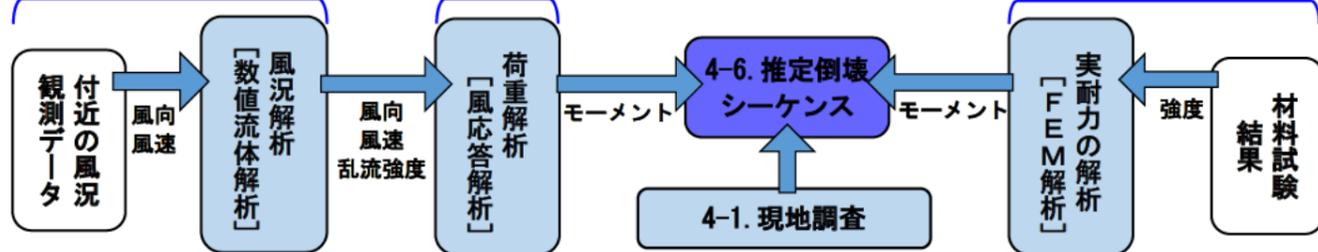


図4-4 解析・検証フロー図

4-3. 周辺の風況観測の調査及び当サイトにおける風向・風速等の評価

- ・ 当サイトでは、遠隔監視装置のデータが欠測していたため、事故当時における風況データはない。
- ・ そのため、当サイト近傍に存する関電エネルギーソリューションにおける風況データ（以下、「近傍サイト」）を用いて、事故当時の当サイトにおける風向・風速・乱流強度を解析。
- ・ 解析にあたっては、非線形風況予測モデルを用い、以下の条件で解析を行った。

計算範囲（東西×南北）：15,000m四方
 〃（高さ）：10,000m
 計算風向：30風向（7.5～22.5°）
 水平方向メッシュ間隔：25～200m
 最小格子間隔範囲：3,500m（伸び率1.15）
 垂直方向最小メッシュ間隔：5m（伸び率1.2）

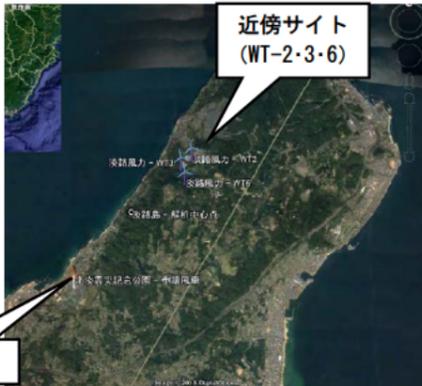


図4-5 各サイト位置図

標高：
 国土地理院10mメッシュ粗度：
 国土地理院100mメッシュ粗度区分：Ⅲ
 当サイトハブ高：37.0m
 近傍サイトハブ高：83.7m

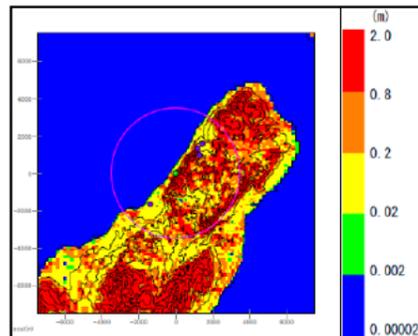


図4-6 サイト付近粗度分布

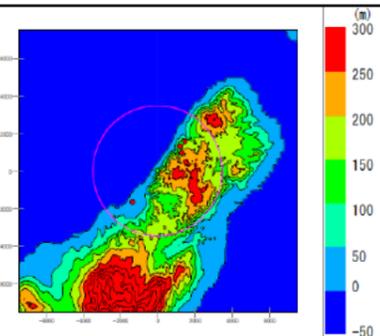


図4-7 サイト付近標高分布

- ・ 当サイトにおける風向・風速の算出にあたっては、以下の手順により数値解析を行った。
 (手順1) 数値流体解析により、当サイトと近傍サイトの風向偏角と風速比を求める。
 (手順2) 数値流体解析から求めた風向偏角と風速比を用いて、近傍サイトで得られる風向・風速を倒壊風車地点のハブ高さでの風向・風速に変換する。
- ・ 近傍サイトから変換された倒壊風車地点のハブ高さでの風速・風向の時間変化は、図4-8と図4-9に示すとおりである。

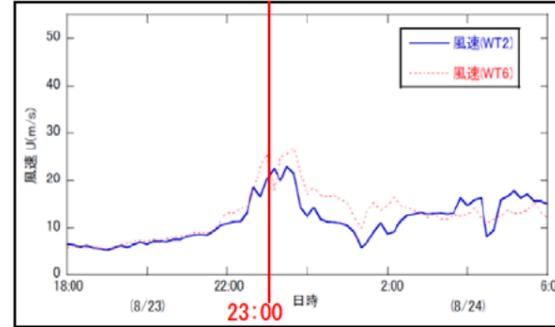


図4-8 倒壊風車地点の風速（ハブ高さh=37.0m）

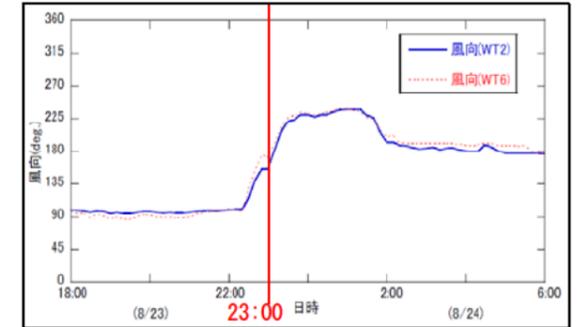


図4-9 倒壊風車地点の風向（ハブ高さh=37.0m）

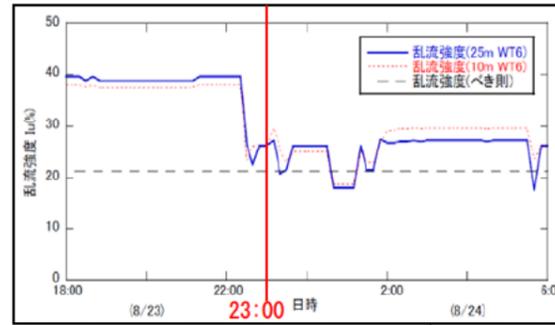


図4-10 倒壊風車地点の乱流強度（ハブ高さh=37.0m）

- ・ 数値流体解析から求められた倒壊風車地点のハブ高さでの乱流強度の時間変化は図4-10に示すとおりである。
- ・ 格子解像度が乱流強度に与える影響を調べるため、25m格子と10m格子による解析を実施したが、その差は非常に小さかった。
- ・ 乱流強度が大きくなった方位には複雑な地形が存在し、その影響によるものである。

- ・ 23日23:00時点の倒壊風車地点の風速・風向・乱流強度（ハブ高さh=37.0m）の評価結果は表4-1に示すとおりである。

表4-1 風速・風向・乱流強度の評価結果

風速	25.6m/s	風向	172.8°	乱流強度	26.4%
----	---------	----	--------	------	-------

4-4. 事故風車の接合部（破断面）における耐力の評価

- ・ 強度確認のため、9/18～9/19に試験材を採取し、9/27に試験実施。
- ・ コンクリートについては、ペデスタル部・フーチング部で、各々3本づつを圧縮試験。
- ・ 鉄筋については、3本を引張試験。

試験結果（一軸圧縮試験）	
ペデスタル	46.8 N/mm ²
ペデスタル	47.1 N/mm ²
ペデスタル	43.0 N/mm ²
フーチング	30.8 N/mm ²
フーチング	28.3 N/mm ²
フーチング	25.8 N/mm ²
設計基準強度 21N/mm ²	

図4-11 使用材料の調査と結果（コンクリート）

淡路市北淡震災記念公園風力発電設備における倒壊事故について

9/18

9/27

試験結果	
降伏点	引張強さ
370N/mm ²	551N/mm ²
371N/mm ²	549N/mm ²
372N/mm ²	551N/mm ²
JIS規格値 (SD345)	
降伏点	345N/mm ²
引張強さ	490N/mm ²



図4-13 試験による鉄筋の破断面

試験の結果、使用材料は所定の強度を有していることが確認された。また、現地調査においても、露出した鉄筋に、腐食と疲労破壊の痕跡はなかった。

以下の解析要領により耐力評価を行った

- 解析モデル概要 (図4-14 解析モデル全体)
 - 方法：ナセルに水平荷重を単調に与えるFEM解析
 - 対象：風車基礎工及びタワー
 - 鉄筋はトラス要素、その他の要素はソリッド要素でモデル化し解析を行った。
- 使用材料
 - 鉄筋は等方性弾塑性材料とし以下の値とした。

表4-2 諸元 (鉄筋)

ヤング係数 E_s (N/mm ²)	205,000	材料定数
ポアソン比	0.3	材料定数
降伏強度 (N/mm ²)	371.0	試験結果平均値
引張強さ (N/mm ²)	550.3	試験結果平均値
破断ひずみ (%)	23	想定値

コンクリートは等方性弾塑性材料とし以下の値とした。

表4-3 諸元 (コンクリート)

	柱状部	底版部	備考
ヤング係数 E_s (N/mm ²)	34,551	26,875	材料定数
ポアソン比	0.2	0.2	材料定数
圧縮強度 (N/mm ²)	45.6	28.3	試験結果平均値

解析結果

図4-15に示すとおり、解析の結果として、打ち継ぎ面におけるモーメントと回転角の関係が得られた。本風車接合部の実耐力は、表4-4に示すとおりである。

表4-4 耐力の評価結果

接合部耐力	36,584kNm
--------------	------------------

4-5. 事故時に風車に作用する風荷重の評価

- 4-3で得られた風況により風車が受ける風荷重を解析した。

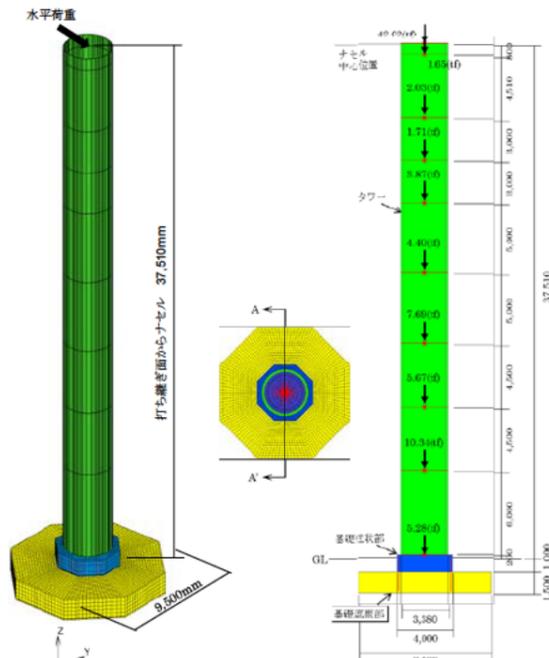


図4-14 解析モデル全体

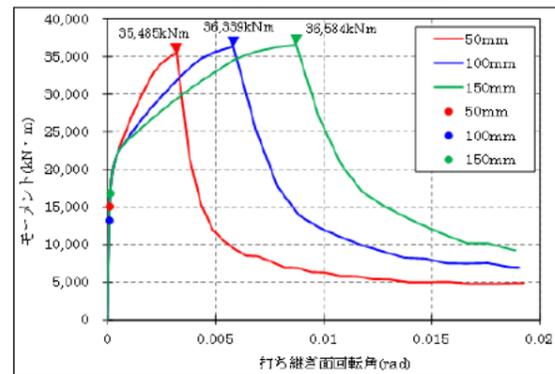


図4-15 モーメントと打ち継ぎ面の回転角の関係図

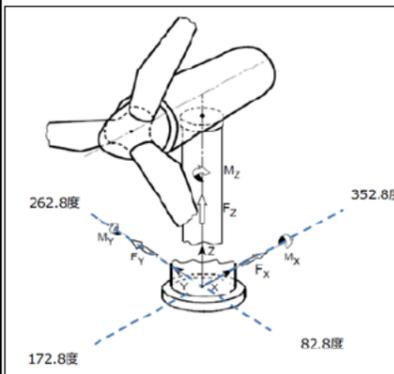


図4-16 座標系

風速：25.6m/s(10分平均)
 風向：172.8度
 乱流強度(u方向)：26.4%
 平均風速と乱流強度の鉛直分布：表4-5の値
 吹上角：0度
 ピッチ角：6~102度

表4-5 風車倒壊時の平均風速と乱流強度の鉛直分布

高度 h(m)	風速(U _w /U _{zp})		乱流強度 I _w (%)		備考
	解析	べき則 (粗度区分Ⅲ)	解析値	べき則 (粗度区分Ⅲ)	
14.6	0.923	0.830	24.7	25.6	
22.5	0.957	0.905	25.6	23.4	
32.0	0.966	0.972	26.2	21.8	
37.0	1.000	1.000	26.4	21.2	ハブ高さ
43.4	1.018	1.033	26.6	20.5	
57.1	1.054	1.091	26.8	19.5	
73.5	1.067	1.147	26.9	18.6	
93.2	1.152	1.203	26.6	17.9	
116.9	1.220	1.259	26.1	17.2	

- 台風時の風向・風速乱流強度を用いて、風車に作用した風荷重を求めた。
- 台風時のタワーベースモーメント (10分間最大値) を図4-17に、タワートップのねじりモーメント (10分間最大値) を図4-18に、ピッチ角16°の時のタワートップねじりモーメントの時系列波形を図4-19に示す。
- 図4-17から、タワーベースモーメント M_y は回転数の上昇に伴い増加し、ピッチ角が18°より小さくなったときに曲げ強度の最大値 (36,584kNm) を超えており、その方向は M_y の正の方向 (352.8度)、すなわち北方向となることがわかる。
- ねじりモーメント M_z は、ヨーモーメント内のブレーキトルク (最大425kNm) を大きく超過している (図4-18)。 M_z は、方向が交互に変わる交番荷重 (図4-19) であり、直ちにナセルの旋回運動につながらないが、すべりの蓄積や風向の変化に伴ってナセルが徐々に遷移し、倒壊が進むにつれて風下方向に回転したと考えられる。

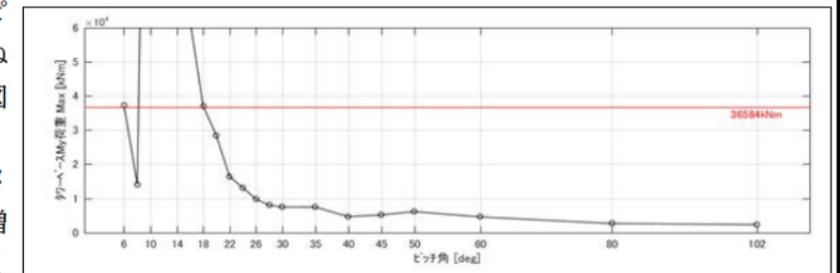


図4-17 台風時のタワーベースモーメント M_y (10分間最大値)

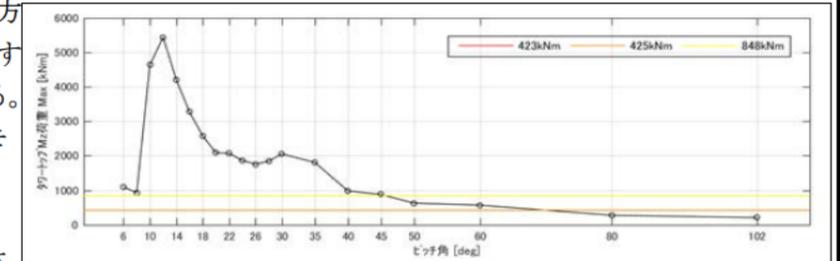


図4-18 タワートップねじりモーメント M_z (10分間最大値)

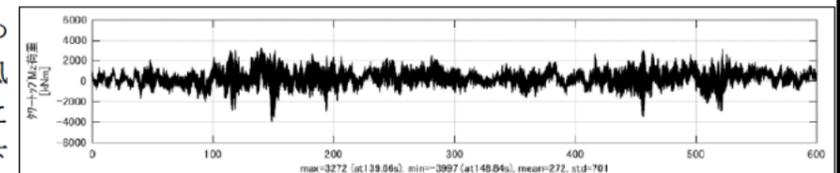


図4-19 タワートップねじりモーメント M_z の時系列波形

4-6. 推定倒壊シーケンス

- 推定された倒壊シーケンスは表4-6に示すとおりである。

表4-6 推定された倒壊シーケンス

①	長期間の電源供給停止により、油圧が抜けて、ピッチのフェザー位置保持能力とヨーブレーキ保持能力は喪失しており、風荷重等の外力により動きうる状態であった。
②	風車が南よりの風を受け、ロータが回転を始め、高速回転となった。
③	高速回転に伴い、風車に掛る風荷重は基礎の実耐力を超過し、鉄筋が破断した。
④	タワーの倒壊にしたがって、ナセルは風下(南側)に回転し、南向きになって地面に激突した。

淡路市北淡震災記念公園風力発電設備における倒壊事故について

5. 倒壊原因と再発防止策

解析結果等から基礎は設計どおりの耐力を確保できており、風車が過回転状態になると、タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力を超えることが判明した。すなわち、今回の風車倒壊事故は、以下の状況により発生した。

- ・ 事故時に電源供給が絶たれていたため、風車の制御ができない状態となっていた。
- ・ 長期電源停止によりピッチ制御の油圧が保持力を失い、台風風の風によりロータ回転数が急激に上昇した。
- ・ ロータ回転数の急上昇に伴い風荷重が増大し、タワー基部に作用する転倒モーメントが基礎の実耐力を上回って、風車倒壊に至った。

5-1. 倒壊原因

風車が制御できない状態になったのは、風車が故障し、廃止を決定した以降、風車への制御電源の供給を長期間途絶えさせてしまったことが大きな要因であると判断する。このような状況になったのは、以下の点に原因がある。

ア 誤認識

- ・ 廃止決定以降、保守点検業者による定期点検の必要性を認識していなかった。
- ・ 風車は故障しているので主電源用開閉器は「切」にしておくべきと認識していた。
- ・ 主電源用開閉器が長期間「切」となった場合のリスクを認識していなかった。

イ 情報共有の問題

- ・ 保安規程による月次点検の際に風車に制御電源が供給されていないことを把握し、管理者に対して口頭で確認をしたが、点検報告書にはその旨を記載していなかった。
- ・ アの誤認識により、所有者・管理者は保守点検業者との定期点検契約を継続しなかったため、保守点検業者との情報共有の場がなくなり、長期間の電源供給停止により、ピッチ制御ができていない状態を発見する機会を失った。

5-2. 再発防止策

事故を防止するためには、今後、以下の対策が必要である。

表5-1 倒壊原因に対する再発防止策

倒壊原因	再発防止策
ア 誤認識	<p>① 担当者の教育 所有者は、担当者に対して、保守点検業者によるOJT (On-The-Job-Training) と、製造者が実施する風車運用保守研修を受講させ、風車の安全管理に関する知識を持たせる。</p> <p>② 風車の運転 所有者は、次のいずれかの方法で風車の運転を行う。 i) 運転責任者を指定し、担当者に上記の教育を受けさせた上で、風車の運転を行う。 ii) 風車については、保守点検契約の内容に運転監視を付加した上で、保守点検業者と契約を締結し、風車の運転を行う。</p>
イ 情報共有の問題	<p>③ 保安規程の修正 保安規程の細則において、風車の制御のために必要な電源が喪失した際には、定期点検の報告書に記載し報告することを定め、保安管理業務外部受託者はこれを確実に実施する。</p> <p>④ 点検結果の情報共有 保安規程の細則において、管理者は定期点検で指摘を受けた事項を所有者に報告することを定める。所有者は、その報告を受けた担当者が上司（運転責任者）に報告する体制を整える。また、保守点検業務の点検結果についても同様とする。</p>